

漁船運用の安全性、効率性向上に関する考察 －船底付着物の影響と対策－

川崎潤二^{1†}, 酒井健一¹, 山下航河², 下川伸也¹

Improvement of knowledge of fishing boat operations. -Influences of ship bottom attachment of barnacles and seaweeds-

Junji Kawasaki^{1†}, Kenichi Sakai¹, Kouga Yamashita² and Shin-ya Shimokawa¹

Abstract: On board research were carried out for investigate the quality of fishing boat under the circumstances, which are observed experimentally in ordinary use on the seas. The present research was prepared in the ordinary operation of maintenances in dock. As the results, it was revealed that fuel consumption was reduced remarkably by cleaning bottom of ship hull, propeller and rudder. And in the condition of foul of ship bottom before cleaning, reducing the rotation speed of the main engine capable of largely improving a fuel efficiency, in comparison to the rate of decrease in ship speed.

Key words: Fisheries, Boat, Seamanship, Efficiency, Fuel, Paint

緒 言

漁船は海面での運航や操業に適した船型を有する。常に水線下の海水に接している船底部やプロペラ、舵部において、長時間の係留等により生物が付着する。船底付着物の影響は、船体抵抗等の増加などにより、漁船の運用に影響することが現場で把握されている。そのため、定期的に陸上に上架し、付着した生物を除去するとともに、付着を防止するための塗料により塗装が一般的に行われている。

このような船底付着物の影響については、これまで水線より下の船体抵抗の増加という観点から、主に燃料消費との関連性について実船を用いた研究が実施されてきた¹⁻³⁾。同様の観点から、船舶に搭載されるディーゼルエンジンからの大気汚染物質の排出規制に関連して、窒素酸化物(NOx)に排出量に及ぼす影響についても実験研究が実施されている⁴⁾。また、船底塗料の種類毎の付着物防止効果

や船体抵抗への影響について現場で検証等が実施されている^{5, 6)}。それら実船を用いた実験や検証以外に、船体抵抗軽減のための塗装に関するシミュレーション手法の開発や、試験片を用いた船底塗料の効果に関する基礎的実験も実施されている^{7, 8)}。

これら船底付着物の船体性能への影響に関する研究については、付着物が抵抗増加につながり、速力や燃費に大きな影響を及ぼすことが把握されている。

本論では、前述した研究成果等を踏まえた上で、船底付着物の清掃前と清掃後の船体性能の違いについてデータ収集分析を行い、船底付着物への対策として、漁業現場に有用な知見として提案を行うことを目的とした。水産大学校の実験実習艇を対象に、上架時に付着物の状況や種類を把握するとともに、燃料消費や船体運動についてデータ収集を行い、それら船底部への付着物の漁船運用への影響を分析することで、影響を軽減化するための方策について考察

2023年11月30日受付, 2024年1月19日受付

1 水産大学校海洋生産管理学科 (Department of Fisheries Sciences and Technology, National Fisheries University)

2 水産大学校海洋生産管理学科学生 (undergraduate student, National Fisheries University)

3 〒759-6595 下関市永田本町2-7-1 (2-7-1 Nagata-honmachi, Shimonoseki 759-6595)

4 † 別刷り請求先 (corresponding author): kawasaki@fish-u.ac.jp

を行った。

船底付着物防止塗料について

船底付着物への対処として、水線下の船体や舵、またはプロペラ部の塗装に用いる塗料に防汚性能を付加することが一般に実施されている。ここでは、船底塗料に関する資料を調査し、関連の規制や現在用いられている船底塗料の特性等について把握した⁹⁻¹²⁾。

従前に船底塗料の成分として使われていた有機スズ化合物は、国際基準により国内での使用は全面禁止されている。すなわち、有機スズ化合物 (TBT, TPT) の低分解性及び環境蓄積性などによる海洋環境汚染への影響が国際的に懸念され、2001年10月のIMO国際会議で「船舶についての有害な防汚方法の管理に関する国際条約」(AFS2001) が採択され、日本国内でも同条約を批准する中で対応がなされてきた。条約の主な内容としては、1) 2003年1月1日以降、すべての船舶において有機スズ化合物を含む防汚方式 (防汚塗料) を新たに塗装してはならない。2) 2008年1月1日以降、船舶は有機スズ化合物を含む防汚方式 (防汚塗料) が船体などの表面に存在してはならない。3) 今後、有機スズ化合物を含む防汚塗料以外の塗料が有害と判断される場合には、規制対象に追加される。の3つが挙げられる。

有機スズ化合物の船底塗料への使用が規制され、現在市販されている防汚塗料は、塗膜の溶解機構の種類によって次の3種類に分類される^{13,14)}。1) 加水分解型防汚塗料 (自己研磨型防汚塗料)。現在の船底塗料として最も主流で、海水中でのみ有効である。2) 水和分解型防汚塗料 (崩壊型防汚塗料)。海水と淡水で有効な塗料である。3) シリコン型防汚塗料。これは、主にプロペラ部に使用されてい

る塗料である。

加水分解型防汚塗料の作用する仕組みについては、防汚塗料の塗膜に加水分解樹脂 (高分子ポリマー) と防汚剤が含有しており、これら含有成分が、海水中で加水分解して塗膜表層から少しずつ溶解して防汚成分を徐放しつつ塗膜を更新する。これにより、塗膜表面を均一に更新し、長期防汚性能を持続させる。つまり、塗料を塗装してできた膜が海水との化学反応で溶けるのと同時に船底付着物がとれる仕組みである。利点としては、海水との化学反応で溶解するため、海域や水温の影響を受けにくいことや、塗膜が溶解しきらない限り効果が持続するなどが挙げられる。欠点としては、溶解には海水が必要なため、河川や湖沼では効果を発揮できないことが挙げられる。

水和分解型防汚塗料の作用する仕組みについては、防汚塗料の塗膜に水に親和性のある樹脂 (化学変化を起こさない) が用いられており、塗膜に水が浸透することで水和層を形成し、防汚剤が水中に徐放される。そして、水流 (船の運動) によって水和層は溶解・研掃される。つまり、塗料を塗装してできた膜に水が浸透して水に溶けやすい層ができ、層が溶けると同時に、船底付着物がとれる仕組みである。利点としては、海水だけでなく、河川や湖沼でも防汚効果を発揮することが挙げられる。欠点としては、溶解反応 (水の浸透) が不均一で、流量量によって塗膜の研磨度合いに差ができてしまうことや、航走機会が少ない船の場合、水生生物が付着しやすいなどが挙げられる。

実験方法

水産大学校実験実習艇「紺碧」は、毎年4月期に造船所の船台に上架し、艇体及び機関の点検とメンテナンスを実



photo1 Experiment ship "KONPEKI"

Table1 Principal particulars

Hull :	Loa	(m)	15.55
	B	(m)	3.40
	D	(m)	1.49
	W	(GT)	12
	Cb		0.46
Engine :	6-cylinder 4-stroke marine diesel engine		
	Type 6GHA-ST		
	Output (kW/rpm)		
	265/2200		

施している。同実習艇は、水産大学校のカリキュラム上の実験や実習を主対象に用いられており、前学期に予定されている各授業への対応準備として、造船所や漁船メーカーとの都合調整により、整備点検を確実に実施することとしている。この整備点検では、船台に上架した後に、艇体やプロペラ部を対象に付着物を除去し、艇体の船底部やプロペラ部に付着物防止のための塗装を行うこととしている。実験実習艇「紺碧」の写真や要目をPhoto1及びTable1に示す。なお、同Tableに示す要目の各略号については、Loa：全長、B：登録幅、D：登録深さ、W：総トン数、及びCb：ファインネス係数・方形係数、としている。

同実験実習艇は、水産大学校棧橋に係留しており、これまで造船所に入渠する際には、係留場所を出港した後、来留見ノ瀬沖を南下し、下関漁港近くまで回航を行っている。船体性能への船底付着物の影響を把握するために、2023年4月に実施した同回航を対象に、データ収集を行った。

収集したデータは、船位、燃料消費及び船体動揺の時系列データとし、水産大学校棧橋から船体を上架する造船所への間の往航と復航時に時系列のデータを収集した。すなわち、GPSデータロガー（HOLUX社製：m-241）で船位の計測を行い、船速を計算するとともに、加速度計（Onset社製：HOBO ペンダントGロガー）で船体加速度の計測を行った。また燃料消費量を調べるために、主機関に回転計（小野測器製：LG-930）と燃料流量計（オーバル製：フローベットEG）を設置し、各計測器から出力された電圧信号をデータロガーに記録した。

航海海域及びGPSによる航跡をFig.1に示す。同海域は関門海峡による潮流の影響を受ける中、潮流の影響が少ない転流時に航行し、また各航海時の気象海象はTable2に示す通り、往航・復航ともに、海況1~2と穏やかな海面での航海を対象とした。Fig.1に示すGPSによる航跡は太い

線が往航を示し、下関漁港から彦島水門を通るルート（計9マイルの航程）で航海を行った。また、同図中、細い線が復航を示し、関門海峡を通峡するルート（計13マイルの航程）で航海を行った。

また、造船所で上架した際に、船底に付着している生物を採取するなど、生物の付着状況と種類についても調査を行った。

結果及び考察

1) 船底部への生物の付着状況と船底塗料の種類について

供試艇を造船所で上架した直後に、船底やプロペラ、舵部の生物の付着状況について確認を行った。Photo2-1及びPhoto2-2写真は船体船底部及びプロペラや舵への付着状況を示している。毎年上架している中で、実験や実習等で海面を航走した回数等により付着している量は若干異なるが、係留時に水面下にある船底部には、生物が付着しているのが確認された。また舵やプロペラ全体にも生物が付着している状態であった。プロペラ部については、後述するように、防汚塗料を塗装しているが、特に塗装していない箇所への生物付着が確認された。

Table2 Whether and Sea condition

	Before cleaning	After cleaning
Date	4/19/2023	4/27/2023
Wind force	1~2	1~2
Wind direct.	Eth~ENE	Eth~ESE
Sea cond.	1~2	1~2



Fig.1 Navigation area and GPS track.
NFU : National Fisheries University

これら船底付着生物を採取し、種類等を調べた結果、イワフジツボ、フサコケムシ、シロホヤ、アナアオサであることを確認することができた³⁾。また付着状況として、イワフジツボが先に船底に付着し、その上に、フサコケムシ、シロホヤ、アナアオサが付着していることが把握された¹⁵⁾。

なお、供試船にはこれまでも継続して、小型船用として最も主流な、加水分解型防汚塗料が使用され、プロペラ部にはシリコン型防汚塗料が使用されている。

2) 船底付着物の燃費への影響について

船底付着物の船体性能への影響を把握するために、船体清掃前と船体清掃後に収集した航走状態毎の燃費データの比較を行った。Fig.2には、横軸を主機回転数 (rpm/m)、縦軸を燃料消費量 (L/h) とし、1秒間隔でデータをプロットし、船底清掃前（以下に“清掃前”）と船体清掃後（以下に“清掃後”）で比較を行った。清掃前の回転数については、

主機関の冷却水温度が上限に達し、1400回転までしか上げることができなかった。また、清掃前は、主機回転数が1000回転を超えた辺りから、主機回転数に対して燃料消費量が多くなり、燃費効率がかなり悪化していることが把握された。同様にFig.3には、横軸を主機回転数 (rpm/m)、縦軸を船速(knot)とし、清掃前と清掃後で比較を行った。清掃前は、回転数が1000回転を超えた辺りから、船速は最大で6~8knotに抑えられていることが把握された。またFig.4には、横軸を燃料消費量 (L/h)、縦軸を船速 (knot) とし、清掃前と清掃後で比較を行った。清掃前では、船速が6knotを超えた辺りから燃料消費量が大幅に増え、燃料消費量が増加しても船速はあまり変化しないことが把握された。

以上の関係から漁船の運用、特に漁船運航時の操船における主機回転数、または船速の調整に関して、燃費効率の向上との兼ね合いに関する知見としては、Fig.5及びFig.6



Photo2-1 Condition of hull before cleaning



Photo2-2 Condition of rudder and propeller before cleaning



Photo3-1 Condition of hull after cleaning



Photo3-2 Condition of rudder and propeller after cleaning

に示すように、船底付着物が付いているときは、主機回転数をおおよそ1300回転から1200回転に100回転下げただけで、燃料消費量は20L/hも節約できることが把握された。またその場合でも、船速は1.5knot程度しか減少しないことが確認された。

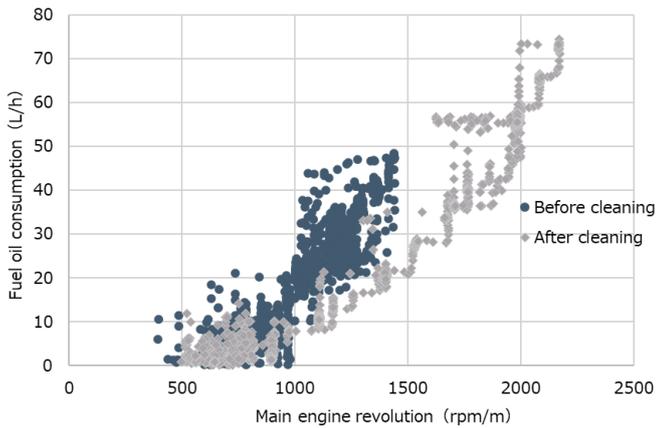


Fig.2 Quantity of fuel oil consumption against main engine revolution.

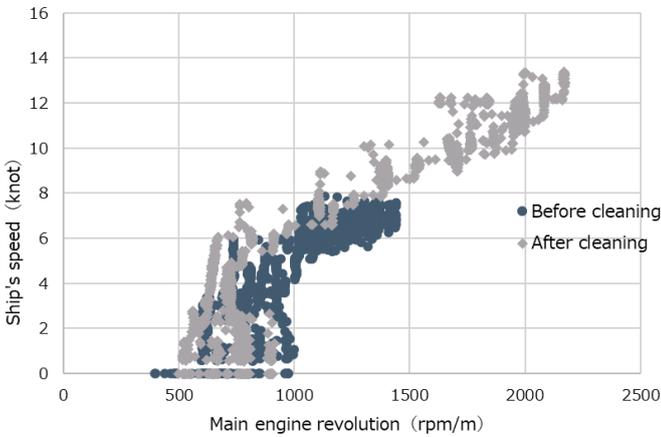


Fig.3 Ship's speed against main engine revolution.

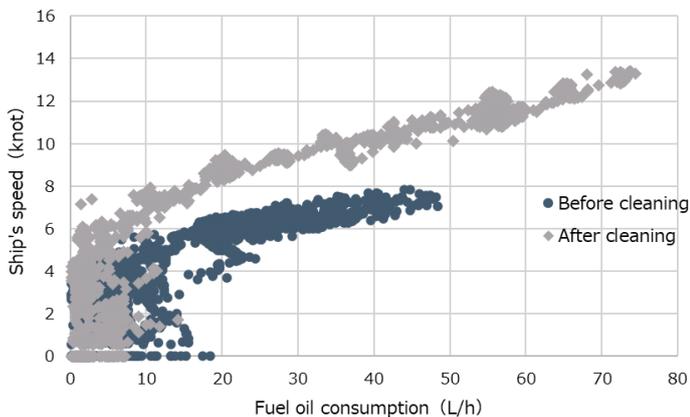


Fig.4 Ship's speed against fuel oil consumption.

Fig.7-1, Fig.7-2及びFig.8-1, Fig.8-2には、清掃前と清掃後の船体運動の特徴を把握する上で、実験時に記録した船体加速度を対象とした分析結果を示す。各Figにおいては、サンプリングタイム5Hzで収集した時系列データから計算した、パワースペクトルを示している。なお、スペクトル計算はFFT法により行い、ウィンドウ等による平滑化は行っていない。また、横軸を船体の横揺れ周期 (Hz), 縦軸をパワースペクトルとして表記している。X軸方向が船首尾方向の加速度を、またY軸方向が船体横方向の加速度を示す。従って、X軸方向はピッチング運動、Y軸方向がローリング運動を主成分とする値となっている。X軸、Y軸において、0.25Hzあたりに検出されている揺れは、航行時の船体固有周期を示し、船体固有の揺れとして観測された。それに対して、清掃前にだけ1.00Hz辺りにも縦揺れ、横揺れの揺れ成分が検出され、船底付着物が船体の抵抗となり、船体運動にも大きく影響していることが把握された。

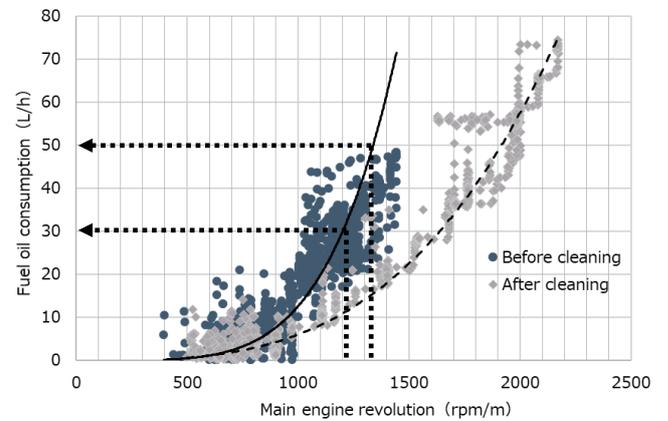


Fig.5 Relationship between fuel oil consumption and main engine revolution.

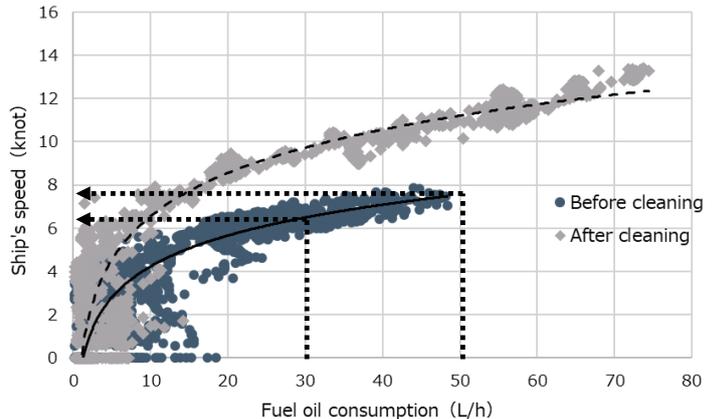


Fig.6 Relationship between ship's speed and fuel oil consumption.

まとめ

水産大学校の実験実習艇を対象に、上架時に付着物の状況や種類を把握するとともに、燃料消費や船体運動についてデータ収集を行い、それら船底部への付着物の漁船運用への影響について分析を行った。船底部に付着する生物の量や付着する箇所については、年毎の帰港や水温等の環境面や、船の稼働状況により異なるなど、一律の数値等として把握することは困難ではあるが、漁船の運用面において有効活用出来る多くの知見が得られた。

船底付着物を含む船体性能として、船速や燃料消費などの効率面へ向上については、漁業種類や地域毎の漁船操業の内容、または漁船の運用状況に対応した検討を行う必要がある。それら個別の対応については、漁船特有の、操業時間を含む運用面での特徴を把握し、効率面の改善が安全性に与える影響を考慮する中で対応していく必要がある¹⁶⁾。今回の実験などで得られた知見を漁業現場に反映していく上で、様々な漁業種類、または船型毎の違いも考慮していく必要がある。また経営面での船体付着物への対応の評価

方法¹⁷⁾を考慮するなど、現場に反映していく上で効果的なデータの提示についても、工夫等していく必要があると考えられる。

今回得られた知見から、主に漁船運用の安全性や効率性向上に関わる内容についてまとめると以下のようになる。

[船底塗料の種類]

各塗料メーカーのホームページから、加水分解型の塗料が漁船向けに多く用いられていることが把握されるが、船底塗料の選択については、加水分解型と水和分解型防汚塗料の特徴を踏まえ、船舶の係船条件や運用状況に合わせた選択が有効である。特に、他の海域等で用いられていた漁船を別の海域で用いる場合などは、「従来から使用していた」という理由のみで同様の塗料を使い続けることが無いよう、環境や運用状況に応じた塗料の使い分けが有効である。

[付着状態に応じた船速の選択]

船底付着物の影響を考慮した漁船運用については、主機回転数を下げることで燃料消費量が大幅に減少するものの、船速の減少は小さいことから、船底付着物が付着して

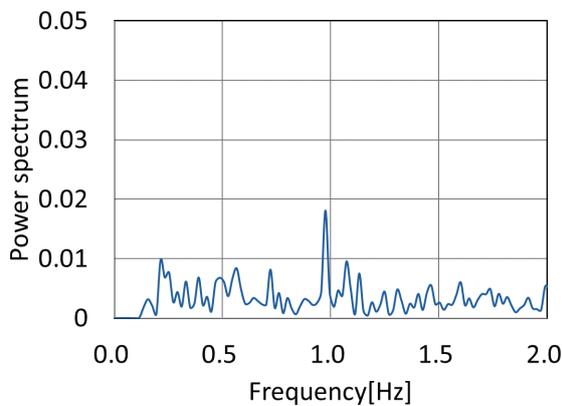


Fig.7-1 Power spectrum of ship acceleration on X-direction. -Before cleaning-

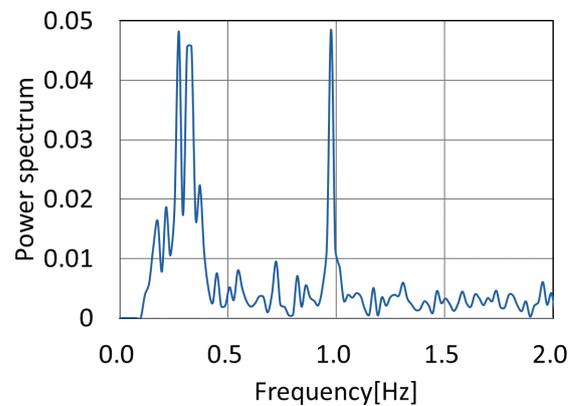


Fig.7-2 Power spectrum of ship acceleration on Y-direction. -Before cleaning-

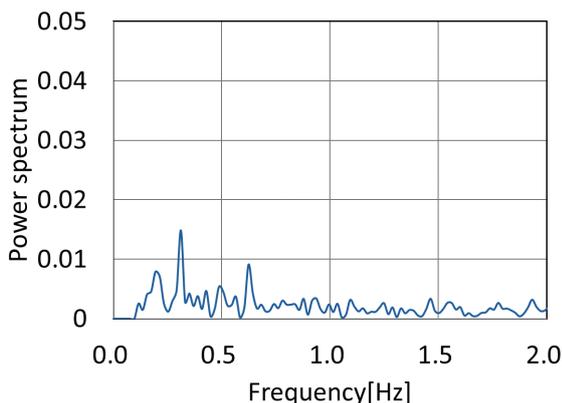


Fig.8-1 Power spectrum of ship acceleration on X-direction. -After cleaning-

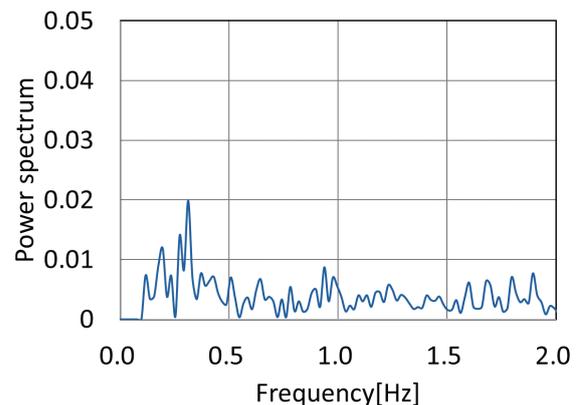


Fig.8-2 Power spectrum of ship acceleration on Y-direction. -After cleaning-

いる状況では、主機関の冷却水温度上昇に注意しつつ、船速が大きく減少しない程度に主機回転数を下げて運航することが有効である。多くの漁船では、燃料の消費状態はアナログ表示の油量計により把握されている中、船速や主機回転数毎の燃料消費量を正確に把握することが困難なため、まずは船底清掃前と清掃後で、主機回転数に応じた船速について、漁船毎に把握しておくことが重要である。把握された主機回転数と船速の関係から、船底や舵、プロペラへの生物の付着状況を推定することが出来ること。そして、付着状況に応じて船速や主機回転数を調整することが、漁船の運用を効率的に行う上で有効となる。

[付着物の安全面への影響]

船底付着物の船体運動への影響については、生物が付着している状況では、船体の振動や揺れが大きくなる傾向にあり、固有周期以外の周期的な振動や揺れが発生する傾向が見られたことから、船底付着生物による船体抵抗の増加が船体の振動や揺れにも影響している可能性があり、復原性能等の安全評価への影響も考えられる。燃費効率に加え、これら船体性能への影響を考慮すると、漁期に入る前に上架し船底各部の清掃と塗装をすることが漁船運用の安全には効果的であること。また、出漁や帰港するタイミングの判断において、特に時化等の海況が良くない際には、大量に船底部に付着している状態においては、付着物が船体性能に影響することを念頭に、無理のない運航計画を立てる必要がある。

謝 辞

供試艇の入渠時に採集した船底付着生物の種類等判別において、水産大学校生物生産学科所属の村瀬昇教授、荒木晶教授にアドバイスを頂いた。この場をお借りして御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 曾禰正夫：青函連絡船の船底汚損が推進馬力におよぼす影響について。日本船用機関学会誌, **16 (2)**, 121-130 (1981)
- 2) 鈴木三郎, 中井 昇：海洋生物付着による船底汚損の影響について。日本航海学会論文集, **68**, 55-64 (1983)
- 3) 三重野紘央, 増田宏：船底塗料の塗膜表面粗度による抵

- 抗増加について－船底外板塗料による船体抵抗低減－。日本マリンエンジニアリング学会誌, **48(3)**, 26-33 (2013)
- 4) 濱口正人, 下川伸也, 内田和良, 前田和幸：小型漁船の船底清掃による燃料消費量とNOx排出量の低減効果。水産工学, **32(3)**, 181-187 (1996)
 - 5) 矢野吉治, 古莊雅生, 戸田保幸, 山盛直樹：船底防汚塗料の実船評価。日本航海学会論文集, 125, 221-226 (2011)
 - 6) 矢野吉治, 山盛直樹, 河合和弥：低摩擦型船底防汚塗料の実船評価－船底防汚塗料の低摩擦化への挑戦－。日本マリンエンジニアリング学会誌, **49(2)**, 71-76 (2014)
 - 7) Michael P. Schultz：Frictional Resistance of Antifouling Coating Systems. *Journal of Fluids Engineering*, **126(6)**, 1039-1047 (2004)
 - 8) 亀山道広 他：船体防汚塗料による生物付着防止効果の計測手法に関する研究。海上技術安全研究所報告, **12(1)**, 1-15 (2012)
 - 9) 高橋一暢：環境に優しい船底防汚塗料の現状と展望。日本マリンエンジニアリング学会誌, **45(4)**, 118-123 (2010)
 - 10) Barry Kidd, Alistair A Finnie, Philip A : Stenson Low Friction Fouling Control Coatings – An International Paint Perspective –。日本マリンエンジニアリング学会誌, **48(3)**, 34-41 (2013)
 - 11) 千葉知義：船底防汚塗料の国際動向について。日本マリンエンジニアリング学会誌, 9-13 (2017)
 - 12) IMO. “Anti-fouling systems”.
<https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Anti-fouling.aspx> (参照2023-11-1)
 - 13) 大沼清利：塗料技術発展の系統化調査。国立科学博物館, 技術の系統化調査報告第15集, 1-79 (2022)
 - 14) 中国塗料株式会社. “防汚塗料の防汚機構”
https://www.cmp.co.jp/tech_rd/cmp_tech/antifouling_coatings/antifouling_system.html (参照2023-08-20)
 - 15) 今原幸光 他：写真でわかる磯の生き物図鑑。トンボ出版, 102-183 (2011)
 - 16) 川崎潤二：漁船労働の特徴と労働環境改善に向けた今後の課題。水産工学, **48**, 223-230 (2012)
 - 17) Sangeeta Sonak, Asha Giriyan and Prajwala Pangam：A method for analysis of costs and benefits of antifouling systems applied on ship hull. *Journal of Ship Technology*, **6(1)**, 73-83 (2010)